

文章编号 1004-924X(2025)12-1864-12

含自由曲面的反射式望远镜降敏设计

王 洋¹, 彭圣博¹, 顾志远^{2*}

(1. 长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022;

2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130031)

摘要:在传统的光学系统设计过程中,光学设计师更注重优化光学系统的性能,而没有考虑这些系统的竣工性能。为了降低对光学系统的公差要求,本文提出一种基于矢量像差理论的含自由曲面的反射式望远镜降敏设计方法。基于矢量像差理论的局部坐标近轴光线追迹方程,分析光瞳的坐标变换关系,并结合 Zernike 多项式的极坐标与直角坐标表达式,推导出 Zernike 自由曲面在一般偏心倾斜状态下的像差解析式。然后,基于该分析框架构建了光学系统的竣工性能评估模型。利用该模型分别设计了含自由曲面的离轴两反和离轴三反望远镜,并通过 2 000 次蒙特卡罗实验分析了系统的装调敏感度。结果表明:经过约 10 min 的优化,离轴两反望远镜的波像差平均值减少了 26%,离轴三反望远镜的波像差平均值减少了 14%,有效验证了本文提出的降敏设计方法的有效性。

关 键 词: 矢量像差;降敏设计;Zernike 自由曲面;离轴反射式系统

中图分类号: TB133 **文献标识码:** A

doi: 10. 37188/OPE. 20253312. 1864

CSTR: 32169. 14. OPE. 20253312. 1864

Desensitization design methods for reflective telescopes with freeform surfaces

WANG Yang¹, PENG Shengbo¹, GU Zhiyuan^{2*}

(1. College of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology,
Changchun 130022, China;

2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,
Changchun 130031, China)

* Corresponding author, E-mail: zhiyuan.gu@hotmail.com

Abstract: In the traditional optical system design process, optical designers focus more on optimizing the performance of the optical system without considering the as-built performance of these systems. To reduce the tolerance requirements for optical systems, this paper proposed a desensitization design method for freeform reflecting telescopes based on nodal aberration theory. This method provided mathematical expressions to describe aberrations generated by freeform terms on general decentered and tilted optical surfaces. To obtain the aberration coefficients of off-axis freeform surfaces, transformed pupil vectors were introduced into the aberration expansion, and only paraxial chief rays and marginal rays were traced to derive the aberration expressions. Then, an as-built performance evaluation model for the optical system was con-

收稿日期: 2025-03-10; 修订日期: 2025-05-08.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 62105331)

structured based on this analysis framework. Using this method, two kinds of off-axis two-mirror and off-axis three-mirror systems containing freeform surfaces were designed, and the assembly sensitivity of the system was analyzed by 2 000 Monte Carlo ray tracing simulations. The results indicate that after about 10 minutes of optimization, the average wavefront aberration of the off-axis two-mirror telescope decreased by 26%, and the average wavefront aberration of the off-axis three-mirror telescope decreased by 14%, effectively verifying the effectiveness of the desensitization design method proposed in this paper.

Key words: nodal aberration; zernike freeform surface; off-axis reflective system; desensitization design

1 引 言

自由曲面具有更高的设计自由度,因此广泛应用于各种光学系统中以提升系统的成像质量或者实现小型化设计^[1-4]。随着自由曲面技术的进步,相关的像差理论也逐渐发展,成为现代光学设计的重要基础。Buchroeder, Shack 和 Thompson 率先阐述并发展了倾斜和偏心系统的矢量像差理论^[5-7],Fuerschbach 等人随后将该理论扩展应用到自由曲面^[8-9]。近期,Yang Tong 在此背景下,重新审视了自由曲面与矢量像差理论的统一模型,并对偏心和倾斜光学表面上 Zernike 自由曲面分量的像差特性展开了深入分析^[10-11]。

尽管自由曲面技术为光学设计带来了显著进步,但光学系统的竣工性能始终是光学设计的最终目标。为此,研究者们积极探索光学系统竣工性能的优化方法。Rogers 使用多重结构来模拟光学系统的误差状态,并利用 Code V 软件的全局优化函数寻找最佳设计方案^[12]。Issiki 提出的 θ -segmentation 方法通过控制光线入射角来降低系统敏感度,并在多种情况下提升了像质^[13-14]。Liu Xingyu 首先通过逐点设计方法生成初始结构,然后选择性地将其装调敏感度较低的光学表面升级为非球面或自由曲面,以此逐步降低系统整体的敏感度,最终实现低敏感度的自由曲面系统设计^[15]。然而,这些方法通常依赖全局优化,需要进行大量的光线追踪以评估图像质量和灵敏度,从而导致计算量的增加。

与此同时,许多研究者基于光学原理建立了解析降敏模型。Meng Qingyu 以同轴两反式光学系统作为研究对象,提出以失调误差引起的光程变化量作为系统误差敏感度评价标准,并推导出了相关的数学表达式^[16]。Gu Zhiyuan 利用矢量像差理论探讨光学表面偏心和倾斜引入的彗差

与像散之间的关系,建立评估模型并优化了 Cooke 三片式系统的竣工性能^[17]。Qin Zichang 将复杂的自由曲面分成多个可以近似为二次曲面的小区域,通过控制其局部曲率来减小由光学系统误差引起的波前误差变化,从而降低系统的误差灵敏度^[18]。

鉴于上述研究背景,本文基于矢量像差理论,对含自由曲面的反射式望远镜的降敏设计方法进行了研究。通过推导波像差与自由曲面的失调(包括偏心和倾斜)之间的解析关系,并将这些像差表示为 Zernike 多项式,从而建立竣工性能模型。该竣工性能模型能够显著减少计算量,仅需追踪近轴边缘光线和主光线,无需进行大量的光线追踪。此方法的提出为含自由曲面的反射式望远镜的降敏设计提供了理论基础。

2 光学系统竣工性能模型

光学系统竣工性能主要由名义性能与装调误差共同影响,光学系统的竣工性能 A 可以通过以下方式进行评估:

$$A = \frac{\int_{\text{field}} \sqrt{N(H)^2 + M(H)^2} dH}{\int_{\text{field}} dH}, \quad (1)$$

其中: $N(H)$ 表示光学系统在视场 H 处的设计残差,优化过程中可以直接从光学设计软件获得; $M(H)$ 表示光学系统在视场 H 处对应的失调引起的像差。

光学系统的装调误差分为轴对称(镜间距误差)和非轴对称(镜面偏心和倾斜)两类。轴对称误差主要引入可通过调焦或调整间隔校正的球差和离焦,而非轴对称误差引入的场不对称彗差和像散是导致像质下降的主要原因,因此是本文的研究重点。

综上,本文选取了归一化的 Fringe Zernike 多项式中的四个主要低阶项,即 $Z_5(0^\circ/90^\circ$ 轴像散), $Z_6(\pm 45^\circ$ 轴像散), $Z_7(X$ 轴彗差), $Z_8(Y$ 轴彗差),用以表征失调产生的彗差与像散。通过分别计算每项 Zernike 多项式系数,将其合成为系统的评价指标 $S(H)$,具体公式由(2)给出:

$$S(H) = \sqrt{\sum_k C_{5,k}^2 + \sum_k C_{6,k}^2 + \sum_k C_{7,k}^2 + \sum_k C_{8,k}^2}, \quad (2)$$

其中:下标 k 代表系统的第 k 个表面; C_5, C_6, C_7 和 C_8 分别为 Zernike 项对应的系数。

当离轴系统处于理论设计状态时,镜片在 X 和 Y 方向的偏心和倾斜分别记作 XDE_{des} , YDE_{des} , ADE_{des} , BDE_{des} , 此时系统的评价指标记为 S_{des} :

$$S_{des} = S(XDE_{des}, YDE_{des}, ADE_{des}, BDE_{des}). \quad (3)$$

当系统发生失调时,对应的在 X 和 Y 方向的偏心和倾斜分别记作 XDE_{mis} , YDE_{mis} , ADE_{mis} , BDE_{mis} , 此时的系统评价指标记为 S_{mis} 。由此,失调引起的像差增量可表示为:

$$M(H) = S_{mis} - S_{des}. \quad (4)$$

依据式(4)和式(2),失调引起的像差增量可用 Zernike 系数进行表征。因此,通过建立 Zernike 系数与光学结构参数的函数关系,便能够控制系统敏感度。下面将推导 Zernike 系数的具体表达式。

3 自由曲面像差的贡献机制

Zernike 多项式是在单位圆内定义的一组正交基函数,它们的低阶项与 Seidel 像差具有相似的形式,因此常用于像差拟合,尤其在自由曲面光学系统设计中有着广泛的应用。Fringe Zernike 多项式的数学表达式如下:

$$z = \frac{c(x^2 + y^2)}{1 + \sqrt{1 - (1 + k)c^2(x^2 + y^2)^2}} + \sum_j C_j Z_j, \quad (5)$$

其中: x, y, z 为面型坐标, c 是表面曲率, k 是圆锥系数, Z_j 为第 j 项 Zernike 多项式, C_j 是第 j 项 Zernike 系数。大多数 Zernike 项可以成对表示为 X 和 Y 分量,可用向量形式表示这些 Zernike 对。

$$CZ(\rho) = (C_x, C_y) \begin{pmatrix} Z_x(\rho, \Phi) \\ Z_y(\rho, \Phi) \end{pmatrix}, \quad (6)$$

其中: $C = Ce^{ia}$ 是 Zernike 对的矢量系数,其中 $C = \sqrt{C_x^2 + C_y^2}$, $\alpha = \arctan\left(\frac{C_y}{C_x}\right)$ 。Zernike 自由曲面可分为球面分量,圆锥分量和 Zernike 分量三部分。对于具有旋转对称特性的球面分量与圆锥分量,其像差场可直接采用传统矢量像差理论进行表征。而自由曲面分量的非对称像差分析需基于 Zernike 多项式与矢量像差的映射关系,通过解析非对称系统中光瞳坐标的变换规律,并引入坐标变换对 Zernike 多项式进行重构,最终建立完整的自由曲面像差模型。

3.1 同轴系统中自由曲面分量的像差分析

自由曲面分量的像差随视场变化,其变化取决于对应视场在光学表面的光瞳(即光束足迹)分布。基于此,本文将讨论自由曲面分量分别位于光阑面和非光阑面时的像差贡献。

3.1.1 自由曲面分量位于光阑面

为分析光阑位置对自由曲面像差的影响,以 Schmidt 光学系统作为示例进行分析,如图 1 所示。在该系统中,自由曲面分量添加至校正板上,并且将该分量视为校正板表面的局部误差或变形。由于校正板位于光阑位置,不同视场的光束足迹在校正板表面上完全重合,因此自由曲面分量对所有视场的像差贡献相同,表 1 总结了不同情况下的像差方程。

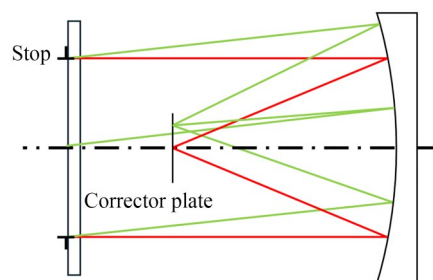


图 1 Schmidt 系统布局图

Fig. 1 Schmidt system layout

自由曲面上孔径矢量 ρ 的方向会受到像面数量(包括中间像面)的影响,从而导致其方向表现出相反的特性。为了简化讨论且不失一般性,在下文的分析中假设光学系统的像面个数为奇

表 1 同轴系统中自由曲面位于光阑面时像差方程

Tab. 1 Aberration equations for a freeform surface located at the aperture stop in a coaxial system.

表面类型	奇数像面	偶数像面
反射面像差	$W(H)=-\frac{2n}{\lambda}C\cdot Z(\rho)$	$W(H)=-\frac{2n}{\lambda}C\cdot Z(-\rho)$
透射面像差	$W(H)=\frac{n_2-n_1}{\lambda}C\cdot Z(\rho)$	$W(H)=\frac{n_2-n_1}{\lambda}C\cdot Z(-\rho)$

数。对于反射表面, n 表示介质的折射率, λ 表示光的波长。在大多数情况下, 反射表面位于空气中, 此时 $n=1$ 。对于折射表面, n_1 和 n_2 分别表示折射表面前后的折射率。此外, 使用矢量系数 Q 来表示上述像差方程中的系数 $-\frac{2n}{\lambda}C$ 或者 $\frac{n_2-n_1}{\lambda}C$ 。

3. 1. 2 自由曲面分量位于非光阑面

如图 2 所示, 当校正板相对于光阑沿光轴方向移动时, 不同视场光线在校正板上的光束足迹会发生错位。又因为每个视场的像差均由其光束足迹区域贡献, 这种错位最终会产生场相关像差。

图 2 中, y 为边缘光线高度, $\bar{y}$ 为主光线高度。又因为轴外视场与中心视场的光束足迹中心发生偏移, 定义偏移矢量 h , 具体形式如式 (7) 所示:

$$h=\frac{r}{R}H=\frac{\bar{y}}{y+\bar{y}}H,$$

(7)

其中: H 为归一化视场坐标, R 为光学表面半径, r 为光瞳半径。并且, 由于此时的光瞳半径小于光学表面半径, 所以还需要引入缩放变换:

$$B=\frac{r}{R}=\frac{y}{y+\bar{y}},$$

(8)

其中, B 为光瞳半径和光学表面半径的比值, 即缩放比例。基于上述光瞳变换, Zernike 分量贡献的波像差可以写为:

$$W=Q\cdot Z(B\rho+h).$$

(9)

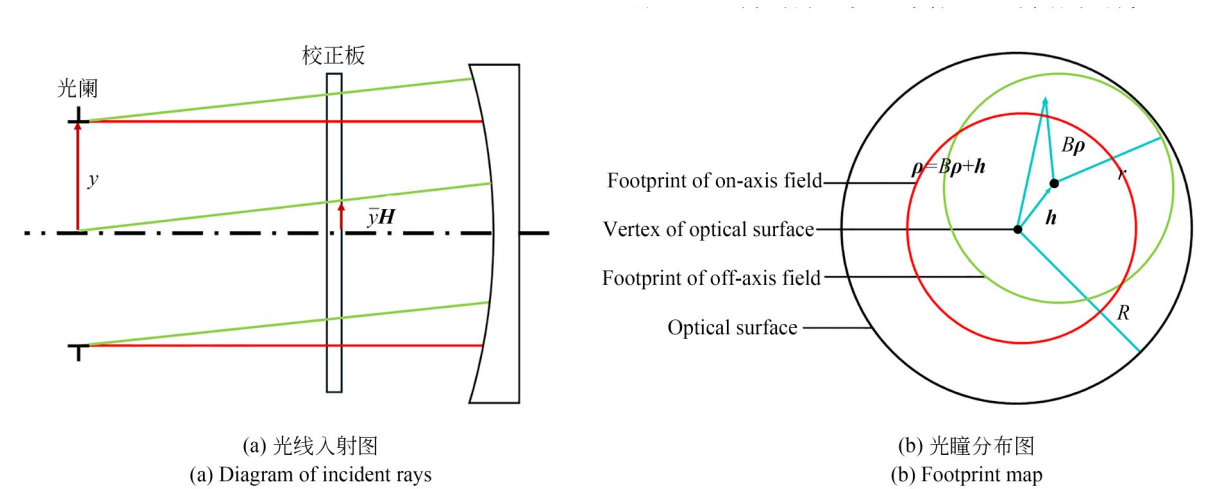


图 2 同轴系统中自由曲面位于非光阑面时光线传播图

Fig. 2 Ray trace diagram for a coaxial system with a freeform surface on a non-aperture stop surface

3. 2 偏心表面上自由曲面分量的像差分析

3. 2. 1 自由曲面分量位于光阑面

如图 3 所示, 当自由曲面发生偏心时, 轴上视场的光瞳中心不再位于自由曲面的中心位置。根据矢量像差理论, 轴上视场的主光线被称为光

轴光线。因此, 追迹光轴光线即可定位轴上视场的光瞳中心。

光学表面半径 R 受偏心的影响, 其值变换为 $y_{\text{OAR}}-YDE+y_0$ 。将光轴光线的入射点与自由曲面顶点的距离记为 k , 则归一化的平移距离 u

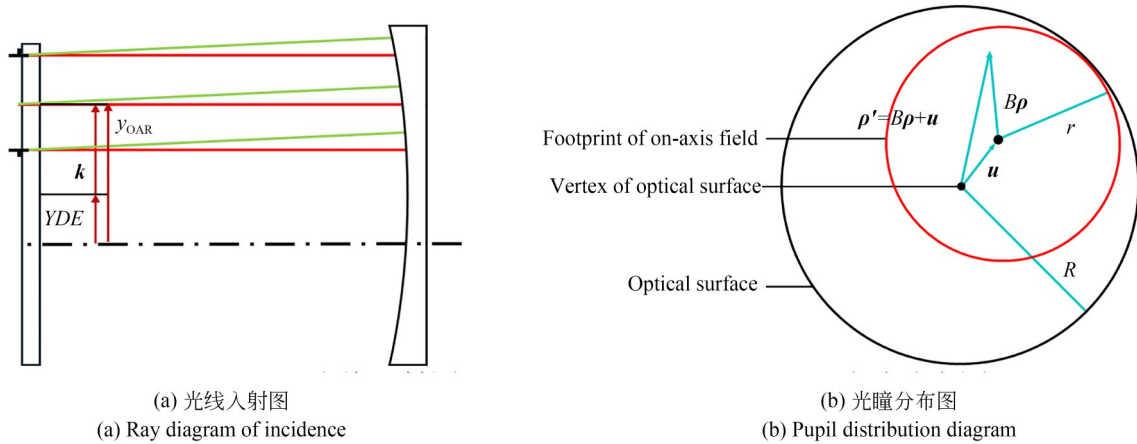


图 3 偏心状态下自由曲面位于光阑面时光线传播图

Fig. 3 Ray trace diagram for a decentered elements with a freeform surface on the aperture stop surface

可以表示为:

$$u = \frac{k}{R} = \frac{(x_{OAR} - XDE)\hat{i} + (y_{OAR} - YDE)\hat{j}}{y_{OAR} - YDE + y}, \quad (10)$$

其中: x_{OAR} 与 y_{OAR} 表示光轴光线在全局参考坐标系中的坐标位置。此时离轴系统中实际的光瞳矢量 ρ 变换为 $B\rho + u$, 则 Zernike 分量贡献的波像差为:

$$W = Q \cdot Z(B\rho + u). \quad (11)$$

3.2.2 自由曲面分量位于非光阑面

如图 4 所示, 与同轴系统类似, 当自由曲面校正板相对于光阑沿光轴方向移动时, 不同视场的

光束足迹会发生错位。

此时, 光学表面的半径 R 变换为 $y_{OAR} - YDE + y + \bar{y}$ 。矢量 h 的定义与上节相同。因此, 此时矢量 u 可以记作:

$$u = \frac{k}{R} = \frac{(y_{OAR} - YDE)\hat{i} + (x_{OAR} - XDE)\hat{j}}{y_{OAR} - YDE + y + \bar{y}}. \quad (12)$$

此时离轴系统中实际的光瞳矢量 ρ 变换为 $B\rho + h + u$, 则自由曲面分量的像差方程可以写为:

$$W = Q \cdot Z(B\rho + h + u). \quad (13)$$

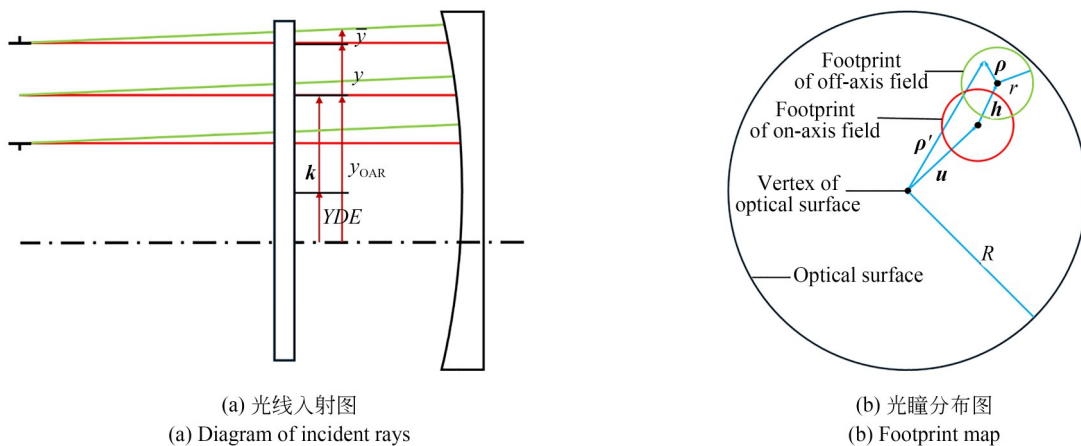


图 4 偏心状态下自由曲面位于非光阑面时光线传播图

Fig. 4 Ray trace diagram for a decentered elements with a freeform surface on a non-aperture stop surface

3.3 倾斜表面上自由曲面分量的像差分析

上述描述的像差是基于光束足迹形状为圆形的假设。然而,当光学表面倾斜时,光束足迹的形状将从圆形变为椭圆形。如图 5 所示,当光学表面绕 x 轴旋转时,光瞳会沿 y 方向拉长。本文选择 y 方向的长轴作为归一化半径,而 x 方向的短轴记为 $s\rho_x$ 。其中, s 表示 y 方向长轴与 x 方向短轴的比值,因此孔径矢量可以记作:

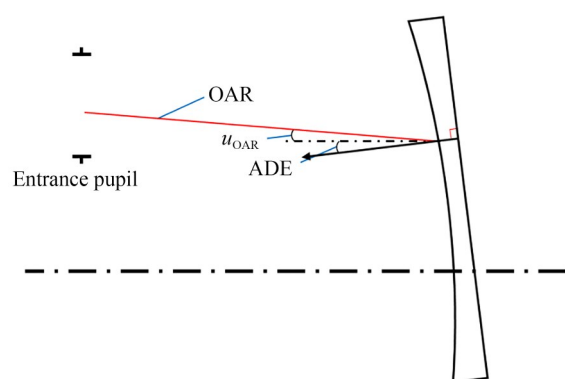
$$\rho_s = s\rho_x \hat{i} + \rho_y \hat{j}. \quad (14)$$

从图中可以看出,圆形光瞳的形变程度由光轴光线与表面倾斜状态共同决定,因此可以得出 s 的大小为:

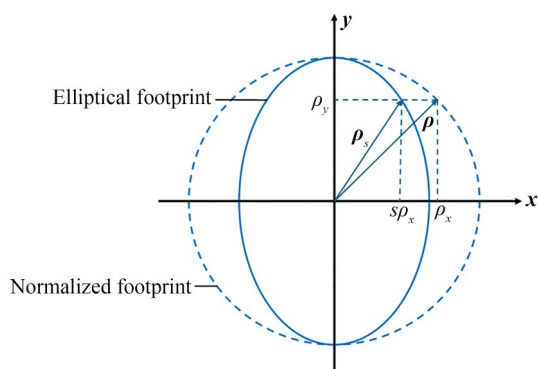
$$s = \cos(u_{\text{OAR}} - ADE), \quad (15)$$

其中: u_{OAR} 为光轴光线的倾斜角度, ADE 为光学表面的倾斜角度。

综上,在偏心和倾斜两种状态下 Zernike 分量所贡献的波像差为:



(a) 光线入射图
(a) Diagram of incident rays



(b) 光瞳分布图
(b) Footprint map

图 5 倾斜状态下光线传播图

Fig. 5 Ray tracing diagram with tilted elements

$$W = Q \cdot Z(B\rho_s + h_s + u_s), \quad (16)$$

其中: ρ_s 和 B 与上述内容具有相同含义;而 h_s 和 u_s 则是受光瞳椭圆化影响,进行了 ρ_s 相同的处理。在一般非对称系统设计中,光学系统通常是关于 yOz 平面对称的,因此在使用 Zernike 自由曲面项时也遵循这一规则。并且考虑到由于失调的引起的倾斜对光学表面椭圆的长轴方向影响甚微,因此为了简化计算忽略掉 BDE_{mis} 对 Zernike 分量的影响,只考虑其对圆锥曲面的影响。基于上述条件,本文将像差以分量形式展开,不同自由曲面项产生的像差如表 2 所示。

综上所述,本文对倾斜和偏心共同作用下 Zernike 分量引起的像差进行了数学描述。结合

表 2 不同自由曲面项产生的像差

Tab. 2 Aberrations generated by different freeform surface terms

像差类型	像差系数
Z5	$B^2(0.5s^2 + 0.5)Q_5$
	$3B^2Q_8(0.5s^2 - 1.5)(h_y + u_y)$
	$12B^2Q_9((1.5s^2 - 0.5)(h_x + u_x)^2 + (0.5s^2 - 1.5)(h_y + u_y)^2)$
	$3B^2Q_{11}(0.5s^2 + 0.5)(h_y + u_y)$
	$12B^2Q_{12}(s^2(h_x + u_x)^2 + (h_y + u_y)^2)$
Z6	$6B^2Q_{17}(0.5s^2 + 0.5)((h_x + u_x)^2 - (h_y + u_y)^2)$
	$-3B^2Q_9(s^2 - 1) - 3B^2Q_{12}(0.5s^2 + 0.5)$
	$3B^2Q_8s(h_x + u_x)$
Z7	$3B^2Q_9s(h_x + u_x)(h_y + u_y)$
	$3B^2Q_{11}s(h_x + u_x)$
	$-12B^2Q_{17}s(h_x + u_x)(h_y + u_y)$
Z8	$8B^3Q_9(0.75s^3 + 0.25s)(h_x + u_x)$
	$4B^3Q_{12}s^3(h_x + u_x)$
	$4B^3Q_{17}(s^3 - s)(h_x + u_x)$
Z9	$B^3Q_8(0.25s^2 + 0.75)$
	$8B^3Q_9(0.75s^3 + 0.25s)(h_y + u_y)$
	$B^3Q_{11}(0.25s^2 - 0.25)$
	$B^3Q_{12}(-4h_y - 4d_y)$
	$4B^3Q_{17}(1 - s^3)(h_y + u_y)$

矢量像差理论中二次曲面基底的像差模型,成功构建了完整的 Zernike 自由曲面像差模型,为降敏优化提供了理论支持。

4 降敏实例

本节应用竣工性能模型对离轴两反望远镜和离轴三反望远镜进行降敏设计,并对比分析了传统优化法、竣工性能模型优化法和 Zemax 内

置 TOLR 方法的降敏效果。

4.1 低装调敏感度两反望远镜设计

4.1.1 离轴两反望远镜降敏优化

本文设计的离轴两反望远镜采用 Zernike 多项式表面,其入瞳直径为 150 mm,F 数为 20,矩形视场为 $0.8^{\circ}\times 0.4^{\circ}$ 。初始系统经过传统优化方式获得,即采用阻尼最小二乘法优化以达到最佳的名义性能,具体的镜头数据如表 3 所示。

表 3 传统优法获得的离轴两反望远镜的镜头数据

Tab. 3 Lens data of an off-axis two-mirror telescope optimized with the traditional optimization methods

表面	半径/mm	厚度/mm	圆锥系数	YDE/mm	C5(λ)	C8(λ)	C11(λ)	C12(λ)
PM	-1741.71	-646.94	-0.95	-240.50	81.21	93.01	0	0
SM	-631.00	769.98	-2.46	-240.50	-90.29	-136.85	-7.80	0.36

离轴系统因缺乏旋转对称性,需增加视场采样数来有效控制其整体的装调敏感度。如图 6 所示,本文采用网格采样,在 3×3 的网格上选取了一系列视场点。

为验证竣工性能模型的效果,将其编程为 Zemax 宏,并输出装调敏感度指标。随后,将此宏集成至评价函数中,用于在优化过程中量化元件失调所致的预期波像差波动。此量化分析中,设定了各光学表面的预期失调值,其中主镜和次镜的最大 X/Y 方向偏心和倾斜分别为 ± 0.1 mm 和 $\pm 0.1^{\circ}$ 。

在优化过程中,采用默认的波前 RMS 评价函数,同时保持系统的 F 数不变,并利用最小二乘法对系统进行局部优化。优化中使用的 CPU 是 AMD Ryzen 9 7950X3D @ 4.20 GHz,可在 10 min 内完成优化,具体镜头数据如表 4 所示。

为了对比竣工性能模型的效果,采用 Zemax

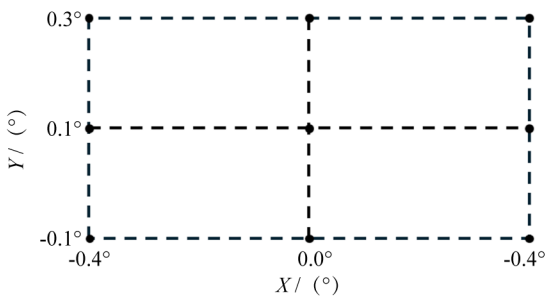


图 6 离轴两反望远镜的视场采样点

Fig. 6 Field sampling points of an off-axis two-mirror telescope

内置的优化操作数“TOLR”对示例系统进行降敏,并且优化设置保持不变。经过大约 4.5 h 的优化,系统数据如表 5 所示。对比上述三种不同优化方法得到的光学系统布局图,发现三种系统的整体结构基本一致。

表 4 竣工性能模型优化法获得的离轴两反望远镜的镜头数据

Tab. 4 Lens data of an off-axis two-mirror telescope optimized with the as-built performance model

表面	半径/mm	厚度/mm	圆锥系数	YDE/mm	C5(λ)	C6(λ)	C7(λ)	C8(λ)
PM	-1 770.19	-650.83	-0.60	-171.97	-33.26	137.57	0.00	0.00
SM	-664.62	799.33	-0.52	-171.97	-70.29	-160.77	-25.17	-11.47

表 5 TOLR 法获得的离轴两反望远镜的镜头数据

Tab. 5 Lens data of an off-axis two-mirror telescope optimized with the TOLR method

表面	半径/mm	厚度/mm	圆锥系数	YDE/mm	C5(λ)	C6(λ)	C7(λ)	C8(λ)
PM	-1 742.55	-647.37	-0.81	-171.17	-59.94	74.35	0.00	0.00
SM	-631.10	769.24	-1.39	-171.17	-103.42	-108.60	11.22	-5.34

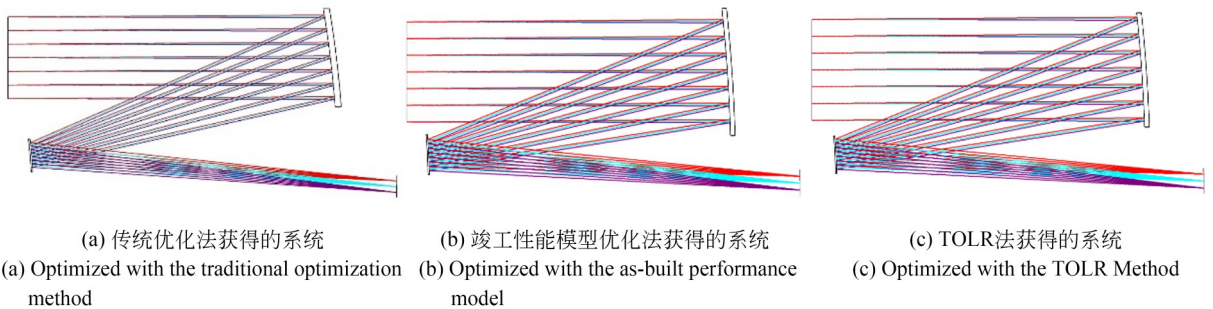


图 7 离轴两反望远镜的布局图

Fig. 7 Optical layout of the off-axis two-mirror telescope

4. 1. 2 离轴两反望远镜的降敏分析

本文采用蒙特卡罗容差分析方法,对上述三种系统进行了 2 000 次样本仿真,以预测系统的装调性能。在公差分析中,以前置光阑为基准,将主镜和次镜的偏心和倾斜量作为系统的装调公差,并设为均匀分布。具体而言,设置每个表面在 X 和 Y 方向的最大偏心公差为 $\pm 0.1\text{ mm}$,X 和 Y 轴的最大倾斜公差为 $\pm 0.1^\circ$ 。此外,将像面位置作为补偿器进行考虑。蒙特卡罗样本统计分析结果汇总于表 6。

表 6 中的统计结果显示,系统的最大波像差从 0.88λ 降至 0.62λ ,波像差的平均值减少了 26%。此外,标准差从 0.051 9 降低至 0.028 5,表明波像差的离散程度更为稳定。如图 8 所示,采用该竣工性能模型优化的系统波像差分布更

表 6 离轴两反望远镜的蒙特卡罗实验的统计结果

Tab. 6 Monte Carlo simulation statistics for the off-axis two-mirror telescopes

	传统优化法	竣工性能模型优化法	TOLR 优化法
名义值(λ)	0.072 7	0.083 0	0.075 1
最佳(λ)	0.076 1	0.083 6	0.077 2
最差(λ)	0.884 7	0.620 3	0.636 0
平均值(λ)	0.426 7	0.313 1	0.321 5
标准差	0.160 8	0.113 2	0.115 5

集中,良品率曲线相较于传统系统上升速度明显加快。此外,在 80% 的良率下,本文方法中的像差为 0.417λ ,比传统优化法实现的 0.570λ 低约 27%。

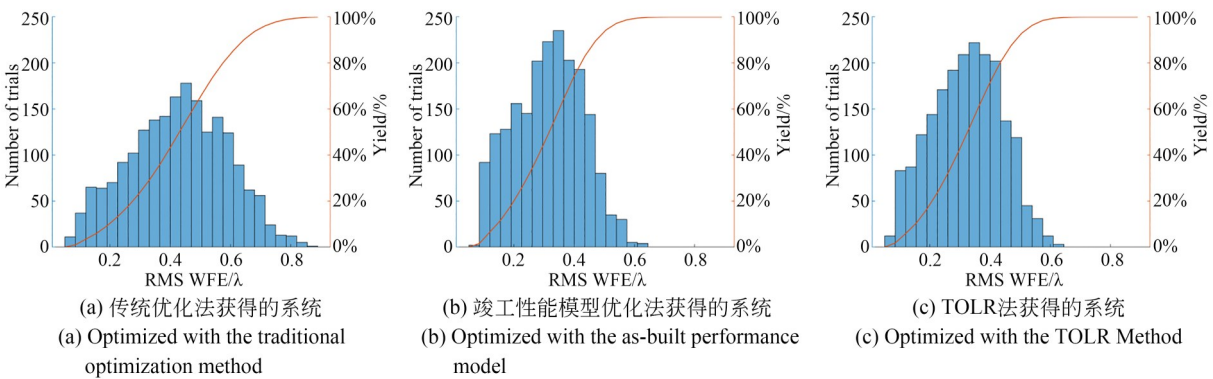


图 8 离轴两反望远镜蒙特卡罗实验柱状图与良品率曲线

Fig. 8 Histogram and yield curve of Monte Carlo simulation results for an off-axis two-mirror telescope

4. 2 低装调敏感度三反望远镜设计

4. 2. 1 离轴三反望远镜的降敏优化

本文选取具有中间像面的离轴 TMA 系统为

例进行降敏优化,其入瞳直径为 100 mm,矩形视场为 $5^\circ \times 1.5^\circ$,F 数为 5。示例系统的镜头数据如表 7 所示。

表 7 传统优化法获得离轴三反望远镜的镜头数据

Tab. 7 Lens data of an off-axis three-mirror telescope optimized with the traditional optimization methods

表面	曲率半径/mm	厚度/mm	二次系数	YDE/mm	C5(λ)	C8(λ)	C9(λ)	C11(λ)	C12(λ)	C17(λ)
主镜	-623.91	-279.76	-0.78	-100.03	0	0	0	0	0	0
次镜	-217.94	315.81	-7.49	-100.03	-39.67	-71.78	-97.32	14.19	-19.73	0.42
三镜	-286.53	-306.26	-0.11	-100.03	38.57	0.40	10.50	3.80	2.08	0.19

此时,三反望远镜的视场离轴为 1.1° ,视场采样点选用 5×5 的网格,如图 9 所示。在三反望远镜的降敏设计过程中,维持了与两反望远镜相同的优化设置及权重分配。但针对反射镜公差分配作出调整:以主镜为基准面,对次镜和三镜分配预期失调量。具体实施中,次镜与三镜在 X/Y 方向的偏心公差设置为 $\pm 0.3\text{ mm}$,倾斜公差设置为 $\pm 0.05^\circ$ 。系统在 10 min 内完成降敏优化,具体镜头参数如表 8 所示。

为了比较本文竣工性能模型的竣工性能和优化用时,仍然采用 TOLR 操作数进行降敏,经过大约 2.5 h 获得对照组,镜头参数如表 9 所示。如图 10 所示,上述三种不同优化方法得到的光学

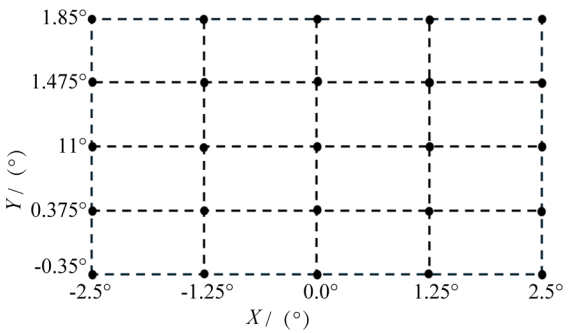


图 9 离轴三反望远镜的视场采样点

Fig. 9 Field Sampling points of an off-axis three-mirror telescope

系统布局基本一致。

表 8 竣工模型优化法获得的离轴三反望远镜的镜头数据

Tab. 8 Lens data of an off-axis three-mirror telescope optimized with the as-built performance model

表面	曲率半径/mm	厚度/mm	二次系数	YDE/mm	C5(λ)	C8(λ)	C9(λ)	C11(λ)	C12(λ)	C17(λ)
主镜	-651.57	-299.89	-0.78	-94.81	0	0	0	0	0	0
次镜	-216.66	292.22	-11.6	-94.81	-46.47	-48.55	-113.34	24.90	-22.18	2.46
三镜	-278.20	-302.23	-0.09	-94.81	-27.33	4.10	17.67	1.41	1.33	0.13

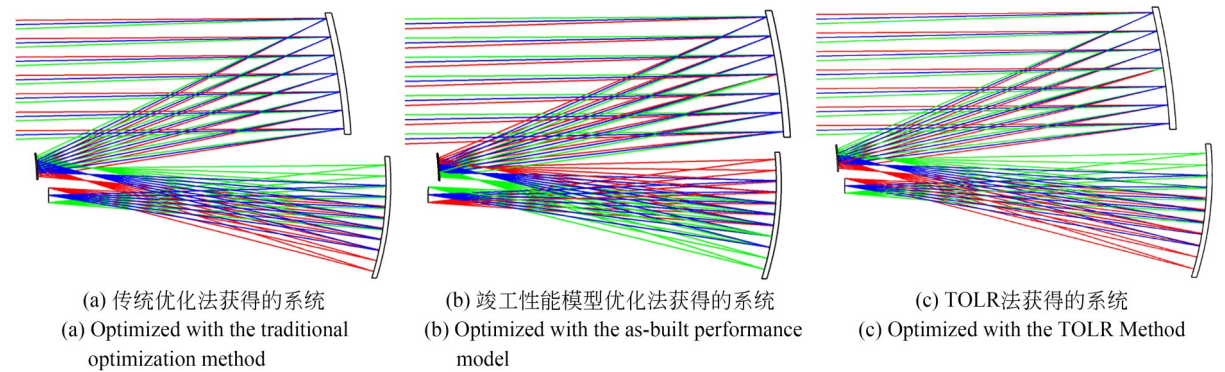


图 10 离轴三反望远镜的布局图

Fig. 10 Optical layout of the off-axis three-mirror telescope

表 9 TOLR 法获得离轴三反望远镜的镜头数据

Tab. 9 Lens data of an off-axis three-mirror telescope optimized with the tolr method

表面	曲率半径/mm	厚度/mm	二次系数	YDE/mm	C5(λ)	C8(λ)	C9(λ)	C11(λ)	C12(λ)	C17(λ)
主镜	-658.86	-299.84	-0.74	-96.34	0	0	0	0	0	0
次镜	-224.20	332.11	-5.84	-96.34	-205.70	-8.26	-72.24	26.35	-21.72	1.34
三镜	-308.07	-326.62	-0.09	-96.34	-77.41	-11.41	16.79	0.78	1.81	0.76

4. 2. 2 离轴三反望远镜的降敏分析

本节采用蒙特卡罗容差分析方法,对上述三种系统进行了 2 000 次样本仿真,以预测系统的竣工性能,并且公差设置与上节相同,统计结果如表 10 所示。结果表明,竣工性能模型优化法得到的系统波像差 RMS 名义值为 0.050 7 λ ,相比于其他两种优化方法有所增大,但是,其他性能指标表明,这种名义性能的轻微牺牲带来了最终竣工性能的明显提升。从波像差的分布来看,系统的最大波像差从 0.575 2 λ 降至 0.492 5 λ ,像差的波动范围减少了 17%;标准差从 0.088 1 降低至 0.070 4,表明系统的抗干扰能力更为稳定;此外,波像差 RMS 平均值从 0.261 1 λ 降至 0.226 6 λ ,降低了 14%。

如图 11 所示,采用本文竣工性能模型优化的

表 10 离轴三反望远镜的蒙特卡罗实验的统计结果

Tab. 10 Monte Carlo simulation statistics for the off-axis three-mirror telescopes

	传统优化法	竣工性能模型优化法	TOLR 优化法
名义值(λ)	0.045 0	0.050 7	0.049 5
最佳(λ)	0.058 8	0.062 6	0.051 4
最差(λ)	0.575 2	0.492 5	0.524 0
平均值(λ)	0.261 1	0.226 6	0.225 6
标准差	0.088 1	0.070 4	0.070 1

系统,其波像差分布更集中,良品率曲线相较于传统系统上升速度更快。并且,80%良品率对应的波像差 RMS 值由 0.337 1 λ 降至 0.285 0 λ ,降低了 15%。

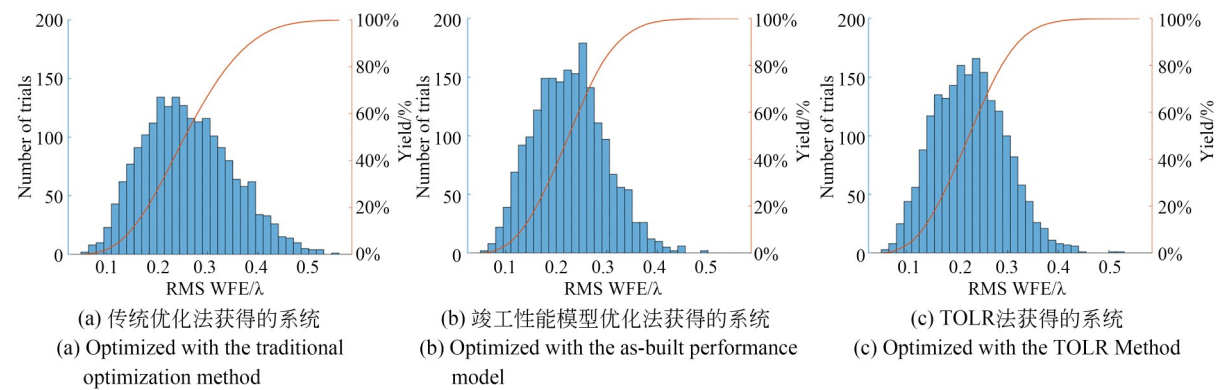


图 11 离轴三反望远镜蒙特卡罗实验柱状图与良品率曲线

Fig. 11 Histogram and yield curve of Monte Carlo simulation results for an off-axis three-mirror system

5 结 论

本文提出了一种基于矢量像差理论的光学系统竣工性能优化方法。通过利用光瞳坐标变换推导自由曲面在偏心倾斜状态下的矢量像差解析式,建立了关联设计参数、失调量与像差增

量的竣工性能模型。该模型可作为宏文件嵌入光学设计软件,充当用户自定义优化目标函数。本文将此方法应用于含自由曲面的离轴两反和离轴三反望远镜优化设计,并通过 2 000 次蒙特卡罗模拟分析了优化后系统的装调敏感度。结果显示,经过约 10 min 的优化,含自由曲面的离

轴两反和三反望远镜平均波像差分别降低了 26% 和 14%。两种反射式望远镜的优化设计验证了本文提出的竣工性能模型的有效性,可以应用于含自由曲面的离轴反射式望远镜的降敏设计。

作者贡献声明:

王洋:测量方法的提出,论文构思和撰写;

彭圣博:测量实验的设计及数据整理和分析;

顾志远:论文审核与编辑写作。

参考文献:

- [1] 熊玉朋,陈适宇,黄铨,等. 基于自由曲面光学元件的大视场光学成像系统[J]. 光学精密工程, 2024, 32(9): 1261-1272.
XIONG Y P, CHEN S Y, HUANG C, *et al.* Large field optical imaging system based on freeform surface optics[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2024, 32(9): 1261-1272. (in Chinese)
- [2] 张佳伦,郑玉权,简超,等. 消像散的自由曲面棱镜光谱仪光学系统设计[J]. 中国光学, 2020, 13(4): 842-851.
ZHANG J L, ZHENG Y Q, LIN C, *et al.* Design of a freeform curved prism imaging spectrometer based on an anastigmatism[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(4): 842-851. (in Chinese)
- [3] 张云进,项华中,王亚琼,等. 渐进多焦点自由曲面镜片优化重构[J]. 光学精密工程, 2023, 31(6): 813-821.
ZHANG Y J, XIANG H Z, WANG Y Q, *et al.* Optimization and reconstruction of progressive addition free-form surface lens [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2023, 31(6): 813-821. (in Chinese)
- [4] 蒋成斌,陈智利,王肖同,等. 紧凑式离轴三反光学系统设计[J]. 光电工程, 2023, 50(12): 50-61.
JIANG C B, CHEN Z L, WANG X T, *et al.* Design of compact off-axis triple mirror optical system [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2023, 50(12): 50-61. (in Chinese)
- [5] BUCHROEDER R A. *Tilted Component Optical Systems*[M]. The University of Arizona, 1976.
- [6] SHACK R V, THOMPSON K. Influence of alignment errors of a telescope system on its aberration field[C]. *Optical Alignment I. San Diego. SPIE*, 1980.
- [7] THOMPSON K. Description of the third-order optical aberrations of near-circular pupil optical systems without symmetry[J]. *Journal of the Optical Society of America A, Optics, Image Science, and Vision*, 2005, 22(7): 1389-1401.
- [8] FUERSCHBACH K, ROLLAND J P, THOMPSON K P. Extending nodal aberration theory to include mount-induced aberrations with application to freeform surfaces [J]. *Optics Express*, 2012, 20(18): 20139-20155.
- [9] FUERSCHBACH K, ROLLAND J P, THOMPSON K P. Theory of aberration fields for general optical systems with freeform surfaces[J]. *Optics Express*, 2014, 22(22): 26585-26606.
- [10] YANG T, ZHU J, JIN G F. Nodal aberration properties of coaxial imaging systems using Zernike polynomial surfaces[J]. *Journal of the Optical Society of America A, Optics, Image Science, and Vision*, 2015, 32(5): 822-836.
- [11] YANG T, CHENG D W, WANG Y T. Aberration analysis for freeform surface terms overlay on general decentered and tilted optical surfaces[J]. *Optics Express*, 2018, 26(6): 7751-7770.
- [12] ROGERS J R. Using Global synthesis to find tolerance-insensitive design forms [C]. *International Optical Design. Vancouver. OSA*, 2006:.
- [13] ISSHIKI M, GARDNER L, GREGORY G G. Automated control of manufacturing sensitivity during optimization[C]. *Optical Design and Engineering. St. Etienne, France. SPIE*, 2004.
- [14] ISSHIKI M, SINCLAIR D C, KANEKO S. Lens design: global optimization of both performance and tolerance sensitivity [C]. *International Optical Design. Vancouver. OSA*, 2006.
- [15] LIU X Y, GONG T T, JIN G F, *et al.* Design method for assembly-insensitive freeform reflective optical systems [J]. *Optics Express*, 2018, 26(21): 27798-27811.
- [16] 孟庆宇,汪洪源,王维,等. 基于光程变化量的反射式光学系统敏感度理论分析与降敏设计方法[J]. 光学精密工程, 2021, 29(1): 72-83.
MENG Q Y, WANG H Y, WANG W, *et al.*

- Sensitivity theoretical analysis and desensitization design method for reflective optical system based on optical path variation[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2021, 29(1): 72-83. (in Chinese)
- [17] GU Z Y, WANG Y, YAN C X. Optical system optimization method for as-built performance based on nodal aberration theory [J]. *Optics Express*, 2020, 28(6): 7928-7942.
- [18] QIN Z, MENG Q, WANG X. Desensitization design method of a freeform optical system based on local curve control [J]. *Opt Lett*, 2023, 48(1): 179-182.

作者简介:



王 洋(1986—),女,博士,副教授,硕士生导师,2014年于中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所)获得博士学位,主要从光学系统设计与像差理论方面的研究。E-mail:wangyang@cust.edu.cn

通讯作者:



顾志远(1986—),男,吉林长春人,博士,副研究员,硕士生导师,2009年于大连理工大学获得学士学位,2016年于中国科学院大学获得博士学位,主要从事空间光学系统设计、装调与检测等方面的研究。E-mail: zhiyuan.gu@hotmail.com